

# 学 位 論 文 要 旨

## 古典的スケール不変性に基づく標準模型の拡張と 隠れたカイラル相転移起源の重力波

Classical Scale Invariant Extension of the Standard Model  
and  
Gravitational Waves from Hidden Chiral Phase Transition

金沢大学大学院 自然科学研究科 数物科学専攻

後藤 弘光

## 概要

The phase transitions in the early Universe are associated with symmetry breaking and they can produce a gravitational wave (GW) background if they were first-order type. Therefore the GW signal produced by these phase transition can be a way to investigate the history of the Universe. In this thesis, we investigate the testability of a classical scale invariant extension of the standard model (SM) using the GW background produced by the chiral phase transition in a strong-interacting hidden sector, which, via a SM singlet real scalar mediator, triggers the electroweak symmetry breaking. In this scenario the hidden mesons are realistic candidate for dark matter, which obtain the mass due to the existence of a scalar mediator. Using the Nambu–Jona-Lasinio method in a mean field approximation we estimate the GW signal corresponding to the mass for hidden hadron. We show that it can be tested by future space based detectors such as DECIGO.

素粒子標準模型 (Standard Model; SM) は、素粒子とその相互作用を記述する理論体系である。ゲージ原理とくりこみ可能性に基づいて構成される標準模型は、強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD)、弱い力と電磁気力を統一的に記述する電弱理論、ゲージ対称性を自発的に破ることで、素粒子に質量を与える Higgs 機構、そして 3 世代のクォーク構造の導入による CP 対称性の破れを説明する小林・益川理論からなる。カイラル対称性はクォークの右巻き成分と左巻き成分を独立に回転させる対称性であり、質量項はこの対称性を持たない。低エネルギーでは QCD の強結合性によって、カイラル対称性は力学的に破れる。このカイラル対称性の力学的破れの機構によって、陽子や中性子の大きな質量を説明される。2012 年の欧州原子核研究機構 (CERN) による大型ハドロン衝突型加速器 (Large Hadron Collider; LHC) 実験における Higgs 粒子の発見によって、素粒子標準模型が预言する全ての粒子が発見された。そして重心系衝突エネルギー 13 TeV の LHC 実験によって得られた結果は、標準模型が Planck スケール  $M_{\text{Pl}} \sim \mathcal{O}(10^{19})$  GeV まで正しい理論であることを示唆している。一方、電弱スケール  $v \sim \mathcal{O}(10^2)$  GeV で定義される標準模型は、自身の枠組みによってその起源を説明することはできない。これは電弱スケールと Planck スケールとの間の大きな階層性、 $M_{\text{Pl}}/v \sim 10^{17}$  に対して標準模型が自然な解釈を与えないという理論的課題であり、標準模型を越えた理論はその起源を説明することが期待される。また標準模型の枠組みでは説明できない実験的な事実、ニュートリノ質量、宇宙のバリオン数非対称性、暗黒物質の存在などが存在する。また、標準模型粒子が表現を持たないゲージ対称性 (力) の存在、隠れたセクターの存在も否定できない。標準模型を越えた物理の理解のため、様々な視点から理論の拡張が必要とされている。

本研究では標準模型の理論的妥当性から示唆される古典的スケール不変性に基づき標準模型を拡張する。古典的スケール不変性に基づく拡張は、裸の理論に対して質量次元を持つパラメータを禁止し、TeV スケールにおけるスケール生成機構によって、Planck スケールとの階層性に理論的解釈を与える。本論では隠れた非可換ゲージ対称性  $\text{SU}(n_c)_H$  を導入し、その強結合性から非摂動的に生成されるスケール  $\Lambda_H$  を用いて、暗黒物質と電弱対称性の破れの起源を同時に説明する以下のシナリオに着目した。以下の模型における暗黒物質候補は、隠れたカイラル対称性の力学的破れに伴って生成される、Nambu-Goldstone(NG) 粒子 (隠れたメソン) である。

- 隠れた QCD セクターのラグランジアン

$$\mathcal{L}_H = -\frac{1}{2} \text{Tr} G^{\mu\nu} G_{\mu\nu} + \text{Tr} \bar{\psi} (i\gamma^\mu D_\mu - yS) \psi, \quad (1)$$

$\psi_i$  ( $i = 1, \dots, n_f$ ) は  $\text{SU}(n_c)_H$  の基本表現を持つ隠れたベクトル型のフェルミオンであり、標準模型 1 重項の実スカラー場  $S$  を通して標準模型の Higgs 場と相互作用を持ち、隠れたフェルミオンが超電荷  $Q_i$  を持つ場合には  $\text{U}(1)_Y$  ゲージ相互作用を通して標準模型粒子と相互作用する。隠れたメソンを暗黒物質とするため、超電荷を持つ場合には等しい電荷を仮定する;  $Q_i = Q$ 。

- 隠れたカイラル凝縮、 $\langle \bar{\psi}\psi \rangle \neq 0$ , による間接的な次元変換シナリオ  
模型のスカラーポテンシャルは以下である:

$$V_{\text{SM}+S} = \lambda_H (H^\dagger H)^2 + \frac{1}{4} \lambda_S S^4 - \frac{1}{2} \lambda_{HS} S^2 (H^\dagger H), \quad (2)$$

ここで Higgs 質量項は、隠れたカイラル対称性の力学的破れによって以下のように生成される:

$$\langle \bar{\psi}\psi \rangle \sim \Lambda_H^3 \longrightarrow yS \langle \bar{\psi}\psi \rangle \longrightarrow \frac{\lambda_{HS}}{2} \langle S \rangle^2 (H^\dagger H). \quad (3)$$

カイラル凝縮  $\langle \bar{\psi}\psi \rangle$  によってスケールが生成される。湯川相互作用、 $yS\bar{\psi}\psi$ , の存在によってスカラー場  $S$  は非零の真空期待値を持ち、結果的に Higgs 質量項が生成される。このときスカラー場  $S$  はスケールを伝達する役割を持ち、Higgs 質量はスカラー場の真空期待値  $\langle S \rangle$  に比例する。Higgs 場と相互作用するスカラー場が真空期待値を持つため、 $h$ - $S$  間の混合を引き起こす。この混合は LHC 実験における Higgs 粒子の

精密測定によって、厳しく制限されている。またカイラル対称性の力学的破れにより、 $n_f = 3$  のとき、8 個の NG 粒子 (隠れたメソン) が生成される。

- 隠れたセクターのカイラル対称性の陽な破れ

隠れたセクターと標準模型セクターの接点である湯川相互作用項、

$$\mathcal{L}_H \supset -yS\bar{\psi}\psi, \quad (4)$$

は隠れたフェルミオンのカレント質量  $y\langle S \rangle$  に対応し、カイラル対称性を陽に破る項である。したがって隠れたメソンは擬 NG 粒子であり、質量を獲得する。隠れたメソンの質量起源は、湯川相互作用 (4) であり、その質量は結合定数  $y$  に比例する。また低エネルギーにおける大域的対称性は、湯川結合定数  $y_{ij} = y_i\delta_{ij}$  とする対称性として以下のように分類できる： $n_f = 3$  のとき、

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad & y_1 \neq y_2 \neq y_3 && \text{U}(1)_{B'} \times \text{U}(1)_B \times \text{U}(1)_V, \\ \text{(ii)} \quad & y_1 = y_2 \neq y_3 && \text{SU}(2)_V \times \text{U}(1)_B \times \text{U}(1)_V, \\ \text{(iii)} \quad & y_1 = y_2 = y_3 && \text{SU}(3)_V \times \text{U}(1)_V. \end{aligned} \quad (5)$$

これらが隠れたメソンの安定性を保証する。したがって、湯川相互作用項 (4) は、暗黒物質候補である隠れたメソンの質量と安定性の起源であり、この存在は間接的な次元変換シナリオ (3) の特徴に起因する。

- 先行研究による暗黒物質を用いたシナリオ検証の可能性

ハドロン物理の類推を用いることのできる  $n_c = n_f = 3$  における低エネルギー物理を、平均場近似した Nambu–Jona-Lasinio (NJL) 模型を用いて解析した暗黒物質の現象論は既に議論されている。暗黒物質候補である隠れたメソンがスカラー粒子  $S$  よりも軽い場合 ( $m_{\text{DM}} < m_S$ ) には、結合定数  $y$  の小ささと  $h$ - $S$  混合の制限から、隠れたメソンの対消滅断面積は抑制される。そのため (iii)  $y_i = y$  の場合には、 $S$  粒子のレゾナンス効果 ( $2m_{\text{DM}} \simeq m_S$ ) によってのみ暗黒物質の残存量が説明可能である。このとき暗黒物質探査実験による検証は難しい。また (ii)  $y_1 = y_2 \neq y_3$  かつ  $Q \neq 0$  の場合には、一部の不安定な隠れたメソンの崩壊と隠れた強い相互作用に起因する逆転換過程によって、レゾナンス効果を用いることなく、暗黒物質の残存量が説明され、このとき暗黒物質直接探査実験で観測可能な領域があることが予言された。しかしながら、観測可能な領域は暗黒物質候補の質量が、 $m_{\text{DM}} \simeq 100 \text{ GeV}$  付近に限られている。

上述のような隠れたセクターを用いた拡張は検証の難しさが課題であり、異なる手法による検証可能性の議論が必要である。本論ではハドロン物理において既知である以下の定性的な振る舞いに着目した：

- QCD におけるカイラル相転移は、ストレンジクォークの大きなカレント質量のために、クロスオーバー型である。一方、この相転移はカイラル対称性の陽な破れに依存し、その効果が十分小さい場合には、一次相転移となる。またメソンの質量は、カイラル対称性の陽な破れに比例する。

隠れたセクターのカイラル相転移は、古典的スケール不変性のため一次相転移が示唆され、隠れたメソンは模型の暗黒物質候補に対応する。したがって同一の有効模型を用いて、カイラル相転移とメソン質量の計算を行うことで、シナリオの暗黒物質の質量起源と一次相転移現象との関係を明らかにすることができる。また宇宙の一次相転移は真空泡を生成し、その力学によって重力波が生成されることが知られている。相転移起源の残存重力波スペクトルは一般に次の 3 つの寄与の重ね合わせによって与えられる：

$$h^2\Omega_{\text{GW}} = h^2\Omega_\varphi + h^2\Omega_{\text{sw}} + h^2\Omega_{\text{turb}}, \quad (6)$$

ここで  $h$  は無次元ハッブルパラメータであり、 $\Omega_\varphi$  は真空泡の壁の衝突に関するスカラー場の寄与、 $\Omega_{\text{sw}}$  は衝突後のプラズマ中の音波による寄与、 $\Omega_{\text{turb}}$  はプラズマ中における電磁流体力学的 (MHD) 乱流による寄与である。こ

れら残存重力波スペクトルは、泡の力学を特徴付けるパラメータ  $(T_t, \alpha(\alpha_\infty), \tilde{\beta})$  と、自由なパラメータである泡の壁の速さ  $v_w$  を用いて決定される。本研究では、隠れたカイラル一次相転移における泡の力学を特徴付けるパラメータを計算し、残存重力波スペクトルを予言することでシナリオ検証を試みた。

本論では先行研究同様、ハドロン物理の類推を用いることができる  $n_c = n_f = 3$  を仮定し、暗黒物質探査実験によるシナリオ検証が難しい、(iii)  $y_i = y$  かつ  $Q = 0$  の場合に着目した；このとき模型の自由なパラメータは、以下の4個のパラメータである、

$$(\lambda_H, \lambda_{HS}, \lambda_S, y) . \quad (7)$$

また湯川相互作用項 (4) によって、カイラル凝縮  $\langle \bar{\psi}\psi \rangle \neq 0$  と同時に、スカラー凝縮  $\langle S \rangle \neq 0$  が起こる。これは間接的な次元変換シナリオ (3) の特徴である。本研究ではこの性質を無視しないため、2つの秩序変数を伴うカイラル一次相転移による泡生成を平均場近似した NJL 模型を用いて解析する手法を提案した。

有限温度一次相転移に伴う真空泡の核形成率は、バウンス解の3次元ユークリッド作用によって計算できることが知られている。本論では平均場近似した NJL 模型を用いて、隠れたカイラル一次相転移を記述する3次元ユークリッド作用として、以下を仮定した：

$$S_3(T) = \int d^3x \left[ \frac{Z_\sigma^{-1}(S, \sigma, T)}{2} (\partial_i \sigma)^2 + \frac{1}{2} (\partial_i S)^2 + V_{\text{EFF}}(S, \sigma, T) \right] , \quad (8)$$

ここで  $\sigma$  は、NJL 模型におけるカイラル凝縮  $\langle \bar{\psi}\psi \rangle$  に対応した平均場であり、有効ポテンシャル  $V_{\text{EFF}}$  は、隠れたフェルミオンを積分することで得られる。また平均場近似した NJL 模型は、ツリーレベルで平均場  $\sigma$  の運動項を持たないため、1ループレベルで導出した；ただし波動関数くりこみ定数  $Z_\sigma(S, \sigma, T)$  は、座標に依存せず場のみに依存すると仮定。このとき、O(3) 対称性を持つバウンス解は以下の運動方程式によって得られる：

$$\frac{d^2 \sigma}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\sigma}{dr} + \frac{1}{2} \frac{\partial \ln Z_\sigma(S, \sigma, T)}{\partial \sigma} \left( \frac{d\sigma}{dr} \right)^2 = Z_\sigma(S, \sigma, T) \frac{\partial V_{\text{EFF}}(S, \sigma, T)}{\partial \sigma} , \quad (9)$$

$$\frac{d^2 S}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dS}{dr} - \frac{1}{2} \frac{\partial Z_\sigma^{-1}(S, \sigma, T)}{\partial S} \left( \frac{d\sigma}{dr} \right)^2 = \frac{\partial V_{\text{EFF}}(S, \sigma, T)}{\partial S} , \quad (10)$$

ここで  $r = (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)^{1/2}$  であり、以下の境界条件を満たす、

$$\left. \frac{d\sigma}{dr} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{dS}{dr} \right|_{r=0} = 0, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \sigma(r) = 0, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} S(r) = 0 . \quad (11)$$

場に依存する波動関数くりこみ定数  $Z_\sigma(S, \sigma, T)$  のために、運動方程式は発散を含む可能性があり、バウンス解の存在は非自明である。本論では、波動関数くりこみ定数の平均場  $\sigma$  の依存性によって、境界条件 (11) を満たすとき、カイラル対称性が回復する原点 ( $S = \sigma = 0$ ) において発散が生じず、経路変形法と呼ばれる2次元バウンス解の数値的解法を応用し、バウンス解が得られることを確かめた。泡の力学を特徴付けるパラメータ  $(T_t, \alpha(\alpha_\infty), \tilde{\beta})$  は、3次元ユークリッド作用  $S_3$  と有効ポテンシャル  $V_{\text{EFF}}$  を用いて決定できるため、上述の手法を用いて、模型パラメータ (7) に対応するスカラー場  $S$  の効果を含めた隠れたカイラル一次相転移起源の残存重力波スペクトルを予言できる：

$$(\lambda_H, \lambda_{HS}, \lambda_S, y) \xrightarrow{S_3, V_{\text{EFF}}} (T_t, \alpha(\alpha_\infty), \tilde{\beta}) \xrightarrow{v_w} h^2 \Omega_{\text{GW}}(f) . \quad (12)$$

(iii)  $y_i = y$  かつ  $Q = 0$  の場合、Planck スケールまでスカラーポテンシャルの安定性と理論の摂動性が破れないという理論的制限のもとで、模型パラメータ  $(\lambda_H, \lambda_{HS}, \lambda_S, y)$  を自由に動かしたとき、 $m_{\text{DM}} - \Lambda_{\text{H}}$  平面に予言される領域を図1に示す；これらは Higgs 場の真空期待値  $\langle h \rangle = 246$  GeV を入力とし、以下の条件を満たす：

$$m_h = 125.09 \pm 0.24 \text{ GeV} , \quad \xi_1^{(1)} > 0.99 , \quad m_S \simeq 2m_{\text{DM}} , \quad (13)$$

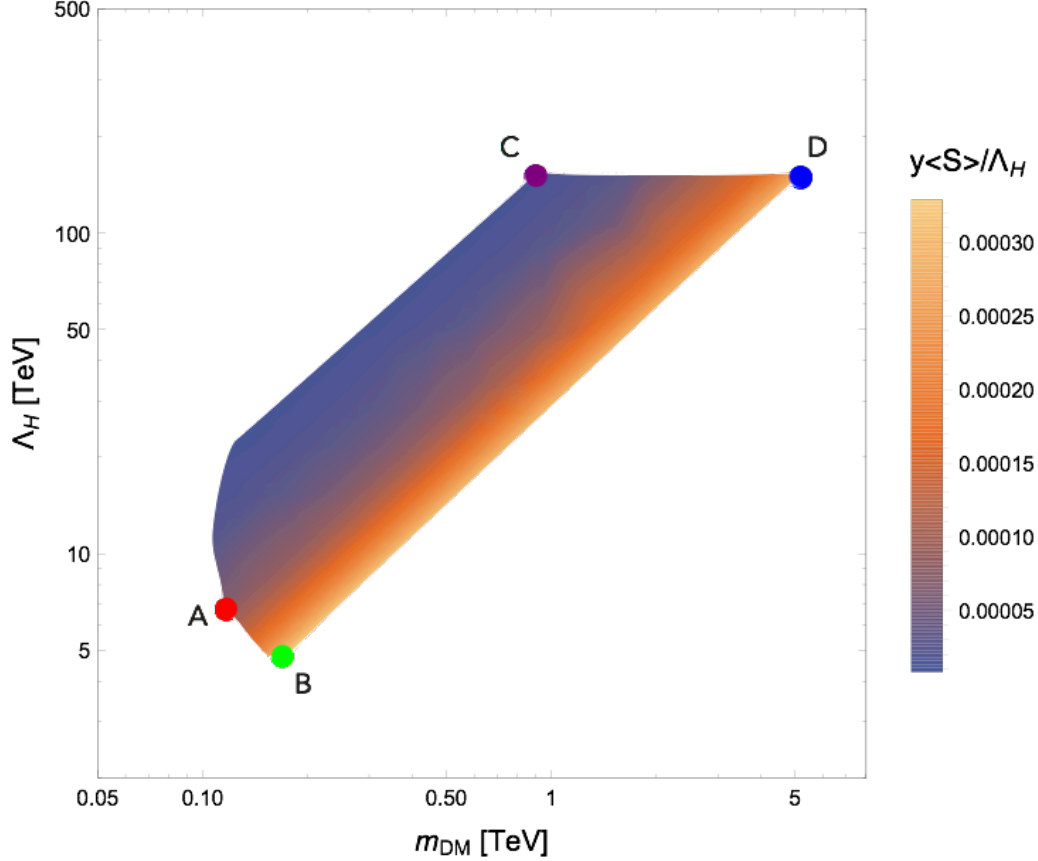


図 1:  $m_{\text{DM}}-\Lambda_{\text{H}}$  平面における模型の予言領域. これらの領域は,  $\langle h \rangle = 246$  GeV,  $m_h = 125.09 \pm 0.24$  GeV,  $\xi_1^{(1)} > 0.99$  ( $h$ - $S$  の混合),  $m_S \simeq 2m_{\text{DM}}$  と Planck スケールまでスカラーポテンシャルの安定性と理論の摂動性が破れないという理論的制限を満足する. 色の濃淡はカイラル対称性の陽な破れの指標  $y\langle S \rangle / \Lambda_{\text{H}}$  の値を示す. 色のついた点 A(赤), B(緑), C(紫), D(青) は本論で用いたベンチマーク点である.

$m_h$  は Higgs 粒子の質量,  $\xi_1^{(1)}$  は  $h$ - $S$  の混合であり, 暗黒物質の残存量はレゾナンスの効果で説明される. ただし隠れた QCD スケールに対する上限  $\Lambda_{\text{H}} < 200$  TeV に対応する  $\lambda_{HS,y}$  の下限を仮定した. また示された領域における色の違いは, 隠れたフェルミオンのカレント質量  $y\langle S \rangle$  を隠れた QCD スケール  $\Lambda_{\text{H}}$  によって規格化した値の違いを示す; 紫 (オレンジ) 色に近づくほど値  $y\langle S \rangle / \Lambda_{\text{H}}$  は小さく (大きく) なる. これは間接的な次元変換シナリオ (3) の特徴である隠れたカイラル対称性の陽な破れを特徴付ける量である. また色のついた点 A(赤), B(緑), C(紫), D(青) はシナリオ検証に用いるベンチマーク点であり, 予言領域の端点から選んだ.

各ベンチマーク点 A–D が予言する残存重力波スペクトルを図 2 に示す. 全体のスペクトル (実線) は, それぞれスカラー場の寄与 (点線), プラズマの寄与である音波の寄与 (破線) と MHD 乱流の寄与 (鎖線) からなる. また色塗られた領域は, 将来重力波検出実験計画である欧州宇宙機関 (ESA) が進めるレーザー干渉計宇宙アンテナ (Laser Interferometer Space Antenna; LISA) や日本の宇宙空間における重力波望遠鏡計画 (Deci-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory; DECIGO) によって観測可能な領域である; LISA は既に 2030 年代の打ち上げが決定しており, 表記 “LISA-N2A5M5L6” は, その感度が最も高い設定に対応する, また表記 “B-DECIGO”, “FP-DECIGO”, “Correlation” は DECIGO で計画されている設計である. 各ベンチマーク点 A–D のスペクトルのピーク点は以下で与えられる:

$$\left( f^{\text{peak}}, h^2 \Omega_{\text{GW}}^{\text{peak}} \right) = \begin{pmatrix} \text{A : } 6.20 \times 10^{-2} \text{ Hz} , & 1.84 \times 10^{-12} \\ \text{B : } 8.82 \times 10^{-2} \text{ Hz} , & 4.88 \times 10^{-13} \\ \text{C : } 1.18 \text{ Hz} , & 2.57 \times 10^{-12} \\ \text{D : } 2.45 \text{ Hz} , & 6.03 \times 10^{-13} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

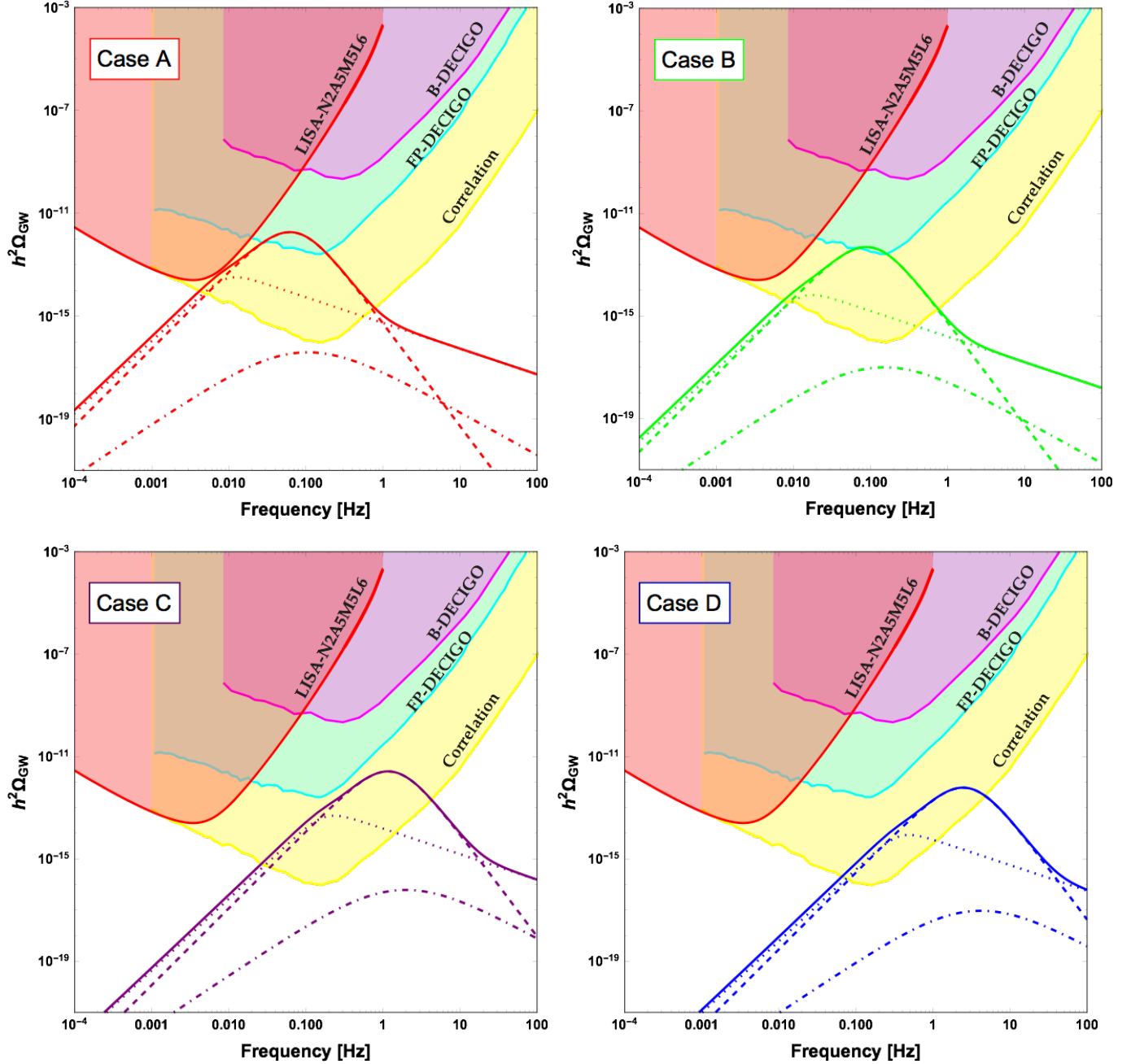


図 2: 各ベンチマーク点 A–D が予想する残存重力波スペクトル: A (左上), B (右上), C (左下), D (右下). 合計のスペクトル (実線) は, それぞれスカラー場の寄与 (点線), プラズマの寄与である音波の寄与 (破線) と MHD 乱流の寄与 (鎖線) からなる. 色塗られた領域は, 将来重力波検出実験計画である LISA (LISA-N2A5M5L6) や DECIGO (B-DECIGO, FP-DECIGO, Correlation) によって観測可能な領域である. ただし泡の壁の速さを  $v_w = 1$  とした.

点 A と点 B のピーク周波数が  $\sim 0.1$  Hz である一方, 点 C と点 D は数 Hz である. このような高い周波数領域に現れるシグナルは, 電弱スケールよりも高いスケールにおける隠れたカイラル相転移の特徴である. これらのスペクトルは LISA での観測は難しいが, DECIGO による観測が期待される.

図 3 にベンチマーク点 A–D を用いて予想される残存重力波スペクトルを, 暗黒物質質量  $m_{\text{DM}}$  と隠れた QCD スケール  $\Lambda_{\text{H}}$  とともにまとめた. これらのベンチマーク点 A–D は, 図 1 に示されるモデルの予想領域の端点から選んだものであり, このシナリオによって説明される暗黒物質候補は隠れた QCD セクターとともに, 隠れたカイラル相転移起源の残存重力波スペクトルを用いて検証できることがわかる. またこれらの結果が実験的に区別でき

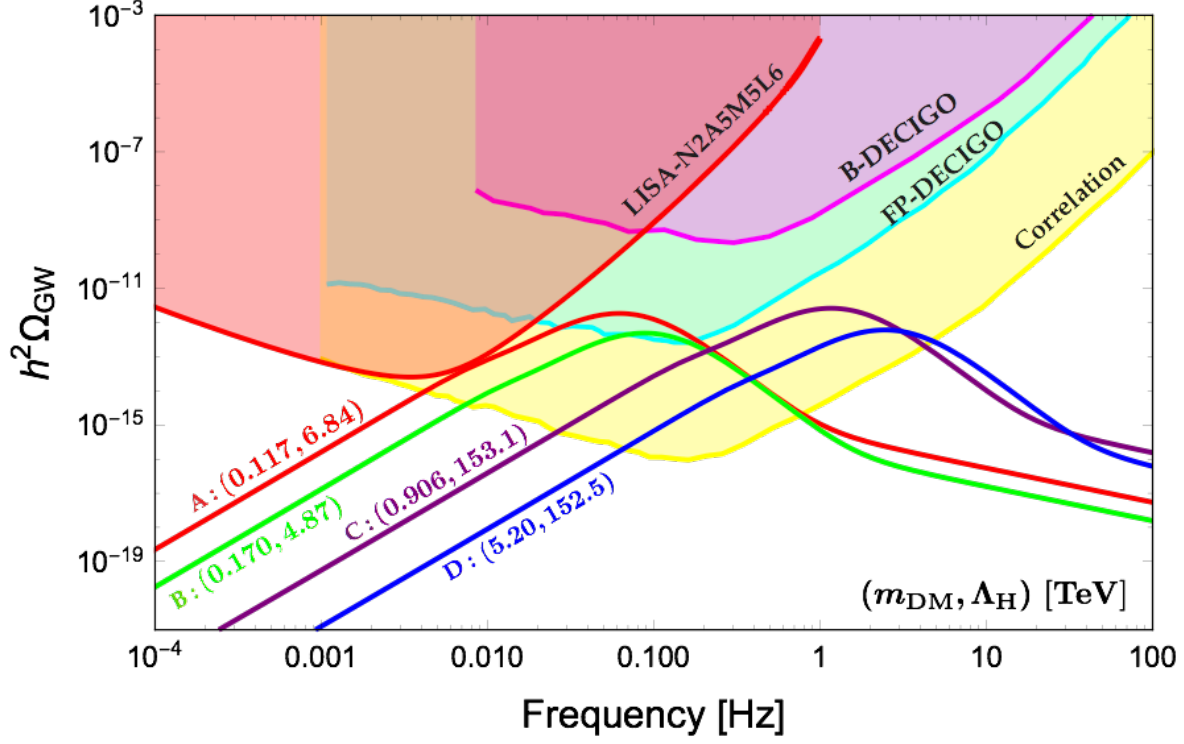


図 3: 予言される残存重力波スペクトル: A (赤), B (緑), C (紫), D (青). 各ベンチマーク点を用いて予言される暗黒物質質量  $m_{\text{DM}}$  と隠れた QCD スケール  $\Lambda_{\text{H}}$  を単位 TeV で表記した. 色塗られた領域は, 将来重力波検出実験計画である LISA (LISA-N2A5M5L6) や DECIGO (B-DECIGO, FP-DECIGO, Correlation) によって観測可能な領域である. ただし泡の壁の速さを  $v_w = 1$  とした.

るなら, 隠れた QCD セクターのスケールだけでなく, 間接的な次元変換シナリオ (3) の特徴である隠れたカイラル対称性の陽な破れの大きさを探る手段になり得ることがわかる. また隠れたフェルミオンが電荷を持つ場合  $Q \neq 0$ , 相転移には影響を与えない一方, 隠れたバリオン  $B$  は電荷を持った安定な粒子として制限を受ける. このとき隠れたバリオンの質量に対して, 上限が与えられる;  $m_B \sim \Lambda_{\text{H}} \lesssim 5 - 6 \text{ TeV}$ . したがってこのようなシナリオが予言する残存重力波スペクトルのピーク周波数は,  $\sim 0.1 \text{ Hz}$  近傍に限られることがわかる. 本論が示した結果は, 有効模型による解析のため理論的な不確定性が存在するが, 隠れた QCD セクターが示す定性的な振る舞いを定量的に評価する 1 つの方法の提案となった. 今後の様々なアプローチによる解析によって, 有効模型による結果の不定性改善が期待される.

本研究では古典的スケール不変性に基づく拡張において, 隠れた QCD セクターの非摂動効果によるカイラル凝縮によって生成されるスケールを用いて, 電弱対称性の破れを説明するシナリオに着目した. このような模型は, 一般に新たなスカラー場を媒介した間接的な次元変換シナリオ (3) を含む. このようなシナリオにおいて, 隠れたフェルミオンとスカラー場の湯川結合が弱い場合には, 標準模型セクターとの結合の弱さのために, 加速器実験や暗黒物質探査実験での検証は困難であった. 一方, 本研究によって定量的に示された隠れたカイラル相転移起源の残存重力波スペクトルの結果は, 湯川結合が弱いほど重力波シグナルが強くなる傾向を持ち, シナリオ検証において相補的な役割を果たすことがわかった. 将来の重力波検出実験において, 暗黒物質を含めた質量起源を説明する隠れた QCD セクターの決定的な検証が期待できる.



## 学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

古典的スケール不変性に基づく標準模型の拡張と隠れたカイラル相転移起源の重力波

2. 論文提出者 (1) 所 属 数物科学専攻

(2) 氏 名 <sup>ふり</sup> <sup>がな</sup> 後藤弘光

3. 審査結果の要旨（600～650 字）

素粒子の標準模型は様々な実験結果を非常に良く説明する理論であるが、暗黒物質の正体を説明出来ないなど、いくつかの問題を抱えており模型の拡張が必要とされている。また、ヒッグス質量をプランクスケールから導くためにはパラメータの微調整が必要であり、この問題を解決する一つの試みとして、質量次元を持つパラメータを禁止した古典的スケール不変性に基づく拡張が提案されている。本論文では、隠れた非可換ゲージ対称性を導入し、その強結合性から非摂動的に生成されるスケールをもとに、暗黒物質とヒッグス質量起源を説明する古典的スケール不変性を伴う拡張模型を議論している。暗黒物質は、隠れたカイラル対称性の力学的破れに伴って生成される南部・ゴールドストーン粒子であるが、標準模型粒子と隠れたセクターとの結合が弱い場合はその探索は困難になり、暗黒物質による模型の検証は難しい。しかしながら著者は、その場合には隠れたカイラル相転移の次数が一次になることに注目し、重力波による模型の検証が可能であることを提案した。宇宙の一次相転移は真空泡を生成し、その壁同士の衝突などによって重力波が発生する。著者は、3次元ユークリッド作用と有効ポテンシャルの解析から重力波スペクトルを定量的に求め、そのスペクトルは将来実験で観測可能な領域にあることを示した。本論文は、古典的スケール不変性に基づく理論に対して、重力波という新たな検証方法を提案した新規性を有する内容であり、博士論文に値すると判断する。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博 士 ( 理 学 )